

(1) Japanese Patent Application Laid-Open No. 2000-147129:

**“PERSONAL NEUTRON EXPOSURE DOSE METER AND NEUTRON DOSE RATE METER”**

The following is a translation of the abstract.

**[Abstract]**

**[Problem to be solved]** To provide a personal neutron exposure dose meter and a neutron dose rate meter capable of realizing a response of an effective dose equivalent.

**[Solution]** A personal neutron exposure dose meter mounts a layer in which a converter such as boron 5 and a proton radiator 6 are mixed on a semiconductor detecting element 1. A neutron dose rate meter is achieved by employing a structure where a thermal neutron absorber having a neutron moderator and an opening surrounds a neutron detector.

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-147129

(P2000-147129A)

(43) 公開日 平成12年5月26日 (2000.5.26)

(51) Int.Cl.

識別記号

F I

キーワード (参考)

G 0 1 T 3/08  
3/00

G 0 1 T 3/08  
3/00

C

審査請求 有 請求項の数 8 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平11-351109  
(62) 分割の表示 特願平3-508260の分割  
(22) 出願日 平成3年4月26日 (1991.4.26)  
(31) 優先権主張番号 特願平2-110092  
(32) 優先日 平成2年4月27日 (1990.4.27)  
(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(71) 出願人 000005108  
株式会社日立製作所  
東京都千代田区神田駿河台四丁目6番地  
(72) 発明者 北口 博司  
茨城県那珂郡那珂町菅谷908-2  
(72) 発明者 出海 滋  
東京都杉並区阿佐ヶ谷南三丁目33番20号  
(72) 発明者 海原 明久  
茨城県日立市末広町五丁目11番8号  
(74) 代理人 100075096  
弁理士 作田 康夫

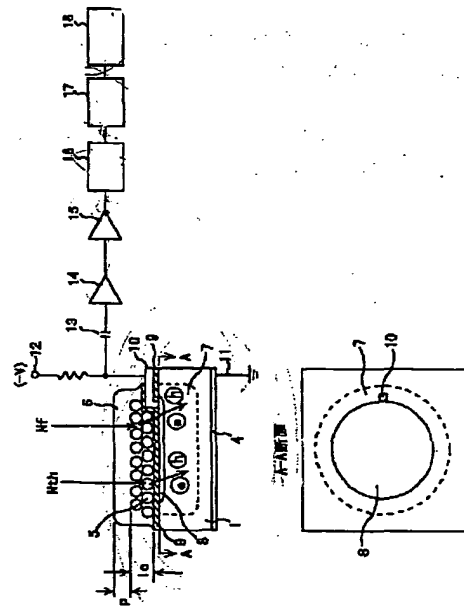
(54) 【発明の名称】 中性子個人被曝線量計及び中性子線量率計

(57) 【要約】

【課題】 実効線量当量の応答を実現できる中性子個人被曝線量計及び中性子線量率計を提供することにある。

【解決手段】 中性子個人被曝線量計はボロン5などのコンバータとプロトンラジエータ6を混在させた層を半導体検出素子1に装着する。中性子線量率計は、中性子検出器を中性子減速体と開口部のある熱中性子吸収体で包囲する構造を取ることによって達成される。

図 4



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】入射した中性子に応じて荷電粒子を発生する異なる2つの物質と、前記異なる2つの物質において発生した荷電粒子を検出する1つの半導体検出素子とを有する中性子個人被曝線量計において、

1 MeV以上のエネルギーを持つ中性子に対する感度が、10 KeV以下のエネルギーを持つ中性子に対する感度より、約20倍以上高いことを特徴とする中性子個人被曝線量計。

【請求項2】前記異なる2つの物質は、主に10 KeV以下のエネルギーを持つ中性子と反応して荷電粒子を発生する第1物質と、主に1 MeV以上のエネルギーを持つ中性子と反応して荷電粒子を発生する第2物質であることを特徴とする請求項1記載の中性子個人被曝線量計。

【請求項3】前記第1物質と前記第2物質は、混在した状態で前記半導体検出素子の表面に密着して配置されることを特徴とする請求項2記載の中性子個人被曝線量計。

【請求項4】前記第1物質はボロンであり、前記第2物質は水素化合物であることを特徴とする請求項3記載の中性子個人被曝線量計。

【請求項5】入射した中性子に応じて荷電粒子を発生する異なる2つの物質と、前記異なる2つの物質において発生した荷電粒子を検出する1つの半導体検出素子と、前記半導体検出素子の中性子入力側を覆う中性子減速材或いは熱中性子吸収体とを有する中性子線量率計において、

1 MeV以上のエネルギーを持つ中性子に対する感度が、10 KeV以下のエネルギーを持つ中性子に対する感度より、約20倍以上高いことを特徴とする中性子線量率計。

【請求項6】前記異なる2つの物質は、主に10 KeV以下のエネルギーを持つ中性子と反応して荷電粒子を発生する第1物質と、主に1 MeV以上のエネルギーを持つ中性子と反応して荷電粒子を発生する第2物質であることを特徴とする請求項5記載の中性子線量率計。

【請求項7】前記第1物質と前記第2物質は、混在した状態で前記半導体検出素子の表面に密着して配置されることを特徴とする請求項6記載の中性子線量率計。

【請求項8】前記第1物質はボロンであり、前記第2物質は水素化合物であることを特徴とする請求項7記載の中性子線量率計。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は原子力発電所や再処理施設等の放射線取扱施設における放射線作業従事者が携帯使用する中性子個人被曝線量計、及び放射線取扱施設内の中性子をモニタする中性子線量率計に関し、中性子を検出するための素子として半導体検出素子を用

いるものに関する。

## 【0002】

【従来の技術】従来の半導体検出素子の中性子個人被曝線量計としては、Radiation Protection Dosimetry (ラディエーション プロテクション ドジメトリ)、Vol.27, No.3, P145~156 (1989) (以下従来技術1という)や米国特許USP3227876号公報 (以下従来技術2という)に記載されたものがある。半導体検出素子は直接の中性子を検出できないために、中性子を他の物質と作用させて荷電粒子を発生させて、その荷電粒子を検出することにより間接的に中性子を検出する。このために、前者の中性子を検出する中性子検出器の構造は、エネルギーの低い熱中性子を検出するために、半導体検出素子の表面にボロン層を形成し、エネルギーの高い高速中性子を検出するために、ボロン層の上にポリエチレン層を設ける構造になっている。また更に、それらの前面に中性子のエネルギーを減速する中性子減速材を配置している。後者の中性子検出器は、前者と同様に半導体検出素子の表面にボロン層を形成し、高速中性子を検出するためにその周囲を中性子減速材で囲むものが開示されている。

【0003】一方、放射線取扱施設内の中性子をモニタする中性子線量率計の従来技術としては、特願昭63-235646号公報 (以下従来技術3という)に記載されているように、BF<sub>3</sub>計数管や<sup>3</sup>He計数管を用いるものが多い。また、同公報には、熱中性子をカットし高速中性子のみを検出するために、前記計数管を中性子減速材で包み、更にその周囲を減速材で、また更にその外側を中性子減速材で包むことが開示されている。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】各国は、各種の放射線検出器としてICRP (International Committee on Radiological Protection)の勧告に沿った実効線量当量評価が可能なエネルギー応答性能が要求されている。わが国も、ICRPの勧告に沿って1989年/4月に国内の放射線障害防止法令が改正された。一般に、同一のエネルギーを持つ放射線を物質に照射しても、物質ごとに受ける損傷 (被曝量)は異なる。実効線量当量とは、人体が中性子を受けたときの被曝量を正確に評価する線量値をいう。この実効線量当量を実現するためには、放射線取扱施設内に存在する広いエネルギー範囲に渡って、各エネルギー毎の人体の被曝量を評価しなければならない。中性子のエネルギー範囲は、0.5 eV以下の熱中性子領域のエネルギーを持つ熱中性子から0.5 eV以上10 MeVにわたる高速中性子までに及ぶ。ここで、各エネルギーに対する感度曲線を応答という。実効線量当量の応答は熱中性子領域とMeV領域との間の感度差は50倍以上もあり、この要求応答を実現することは極めて難しい。以下の説明において、この要求応答を線量当量応答と呼ぶ。線量当量応答を満足させるため

には、大別して①感度曲線の形を一致させる、②各エネルギーに対して感度を高める、の2点が重要である。

【0005】まず、中性子個人被曝線量計の立場から①について考える。従来技術1は、感度曲線を一致させるために、前述した中性子検出器のほかに半導体検出器にポリエチレン層のみを設けた中性子検出器を設け、これら2つの中性子検出器の応答を加算している。しかし、155頁の図11に示すように10KeVから1MeVのエネルギー範囲において応答性能を満足していない。また2つの中性子検出器を用いており、しかも処理回路も複雑になるので大型化する問題点がある。

【0006】次に②について考える。従来技術1、2には半導体検出素子の上にボロン10( $^{10}\text{B}$ )の膜を設け、この膜に中性子が入射したときに発生する荷電粒子( $\alpha$ 線)を半導体検出素子で検出するという構造になっている。このように、熱中性子が入射したときに荷電粒子を発生する物質をコンバータと呼ぶ。従来技術1の中性子検出器では、ボロン10の膜はプラズマドーピングにより1 $\mu\text{m}$ の厚さに形成していた。しかし、ボロンは、その融点が約2300℃と高く、加工性が著しく悪いという欠点があった。またボロンの膜と半導体検出素子を形成するシリコンの熱膨張係数は約3.5倍異なっており、このための温度変化による膜のはく離をさけるためにはボロン膜を1 $\mu\text{m}$ 以上にできない。しかし、ボロン中から発生する $\alpha$ 線の数に膜厚に比例して増大するため、十分な検出感度の中性子検出器を実現する上で問題があった。一方、従来技術1では、拡散でボロンを注入する方法が示されているが、拡散層におけるボロンの濃度を高めることができず、十分な検出感度の中性子検出器を実現することができない。ボロンは熱中性子に対しては大きい確率で核反応を起こして $\alpha$ 線を多く出すが、高速中性子(数eV以上の高エネルギー中性子)にはあまり

$$S_a(E) = D_a(E) \cdot f_a(E) \cdot I_a(E) \quad \dots (数1)$$

ここで、 $D_a(E)$ (図2(b)参照)は、中性子感度応答で、中性子検出器自体の中性子エネルギーEに対する感度応答を示し、 $f_a(E)$ (図2(d)参照)は、ファントム感度応答で、人体あるいは人体模擬体に入射した中性子の中性子検出器への応答を示し、 $I_a(E)$ (図2※

$$S(E) = D(E) \cdot f(E)$$

従って、人体装着されて使用される中性子個人被曝線量計は、人体自体が必然的に所望のファントム感度応答 $f(E)$ を示すから、中性子感度応答 $D_a(E)$ が所望の応答 $D(E)$ を示すようにすることが必要である。一方、中性子線量率計は、少なくとも中性子検出器と人体を模擬するファントムの両方の積の応答で実効線量当量応答 $S(E)$ を満足することが必要である。即ち、中性子検出器自体が実効線量当量応答 $D(E)$ を満足するのであれば、ファントムを人体を模擬するように構成すればよい。また逆に、中性子検出器自体が実効線量当量応答を満足することができなければ、全体的な感度は低下するかもしれ

あまり反応しない。このため、従来技術1に記載されているように、ポリエチレン層を設け、高速中性子が入射したときに発生する荷電粒子(プロトン)を半導体検出素子で検出するという構造になっている。このように、高速中性子が入射したときにプロトンを発生する物質をプロトンラジエータと呼ぶ。しかし、10KeVから1MeVのエネルギー範囲の中性子に対して感度を向上できないという問題があった。

【0007】次に、中性子線量率計について考える。従来技術3では、線量当量応答を満足させることができない。また、従来技術3は、中性子検出の作動電圧が高く、これに伴って計測回路が複雑になり、信頼性に欠点があった。

【0008】また、従来技術1、2には中性子線量率計として用いる考えなく、それに対する考慮がなされていない。

【0009】本発明の目的は、線量当量応答を実現する中性子個人被曝線量計及び中性子線量率計を提供することにある。

【0010】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成する本発明の特徴は、1MeV以上のエネルギーを持つ中性子に対する感度を、10KeV以下のエネルギーを持つ中性子に対する感度より、約20倍以上高くすることにある。

【0011】

【発明の実施の形態】はじめに、本発明の概念について説明する。

【0012】線量当量の応答 $S_a(E)$ は、(数1)で示すことができる。

【0013】

※(c)参照)は入射中性子スペクトルを示す。従って、ICRPの勧告による実効線量当量応答 $S(E)$ は、入射中性子スペクトル $I_a(E)$ が単位スペクトル $I(E)$ の場合の所望の応答である。即ち、(数2)で表現される。

【0014】

$$\dots (数2)$$

れないが、ファントムをそれを補完するように構成し、全体として実効線量当量応答 $S(E)$ を満足させればよい。以上の考え方を基に、目的を達成するための手段とその作用について以下に説明する。

【0015】まず、中性子個人被曝線量計について述べる。中性子個人被曝線量計の場合、中性子検出器の応答は図2(b)に示すようになることが望まれる。本発明では、中性子感度応答 $D(E)$ には大別して2つの曲線があり、第1の曲線が $D_1(E)$ が熱中性子を主体とした低エネルギー中性子と $\alpha$ 線を放出するコンバータに依存し、第2の曲線が $D_2(E)$ が高速中性子を主体とした高

エネルギー中性子によるプロトンを発生するプロトンラジエータに依存するという知見に基づいたものである。従って、従来技術1に示したように中性検出器の前面に設置した中性子減速体は不要である。しかし、単にコンバータとプロトンラジエータをそれぞれ別に層状に設けたのでは、上側、例えば半導体検出素子の上にコンバータ、プロトンラジエータの順に設けたので、プロトンラジエータで発生したプロトンがコンバータで阻止されて半導体検出素子まで到達しない。そこで、本発明の実施の形態では、コンバータとプロトンラジエータとを混在させて層を作り、半導体検出素子の表面に装着させる。この結果、コンバータとプロトンラジエータのそれぞれの量及び全体の層厚を調節することにより中性子感度応答D(E)を満足することが可能となる。コンバータとプロトンラジエータを装着した半導体中性子検出素子の応答はコンバータとプロトンラジエータの装着構造によって大きく変わる。即ち、検出素子の表面に装着するコンバータの量が多ければ熱中性子成分に対する感度が高くなり、逆にプロトンラジエータの量が多ければ高速中性子成分に対する感度が高くなる。従って、このような中性子検出器に電源と処理回路を設けることで、中性子個人被曝線量計を実現できる。コンバータとしては、熱中性子と反応して荷電粒子を発生させればよく、ボロン、リチウム等が挙げられる。また、プロトンラジエータとしては、水素化合物のパラフィン、ポリエチレン及びその他の有機物もしくはそれから構成される樹脂などが挙げられる。以下、一般的には、コンバータとしてはボロンが、プロトンラジエータとしては水素化合物が多く用いられるのでこの2つで代表して説明する。

【0016】次に、熱中性子に対する感度を高める手段について説明する。熱中性子に対する感度を高めるためには、コンバータの層、即ちボロン層の厚さを厚くすることである。しかし、ボロンの融点は約2300℃と高く、加工性が著しく悪いという欠点があり、またボロンの膜と半導体検出素子を形成するシリコンの熱膨張係数は約3.5倍と異なっており、1μm以上にできなかった。本発明の実施の形態では、ボロンを粒状や粉状にして、他の物質と混在させることで、実効的な層厚を厚くすることを可能にしたものである。他の物質としては、シリコンと熱膨張係数があまり変わらないものや、弾性力が合って、ボロンの熱膨張を吸収してくれるものがよい。また、ボロンを粒状にした場合は、粒状ボロンを焼成してボロン層を形成すればその加工は簡単となる。また、この場合ボロン層は粒状ボロンで成っているから、その熱膨張係数のシリコンとの差のために温度変化によるはく離の心配もない。このように、従来より十分厚いボロン層の形成が可能となり、熱中性子に対する感度を大きくすることができる。プロトンラジエータとして用いられる水素化合物を他の物質とすると、ボロンの粒径(平均粒径)を任意に設定することによって、シリコン

表面に密着する水素化合物の量を制御することができ、これによって高速中性子の感度も変化するので、全中性子エネルギーに対する検出器の応答特性を可変設定できるので、実効線量当量応答の実現からも望ましい。また、水素化合物は弾力性があり剥離点からも望ましい。更に、上述の粒状コンバータの間隙にプロトンラジエータで埋める構造では粒状コンバータの粒径が応答を左右することになる。粒径が小さくなれば熱中性子成分に感度が高くなる。コンバータにボロン( $^{10}\text{B}$ )を用いる場合、熱中性子との核反応で1.47 MeVのα線を発生させる。同様に、プロトンラジエータは高速中性子と相互作用を起し陽子線を生成する。これらの荷電粒子(α線、陽子線)が検出素子に入射し、その電離作用で電子-正孔対の電荷を生成する。α線の飛程は10μm以下であり、これ以上の厚さにコンバータを設けても感度応答に差異は生じない。一方、プロトンラジエータから発生する陽子線の飛程は10 MeVで1mm程度となる。従って、この構造の検出素子では素子表面にコンバータの薄い層(数10μm)を設け、コンバータの間隙にプロトンラジエータを埋込み、その上にプロトンラジエータを1~2mm程度積層するのが一般的である。

【0017】中性子個人被曝線量計は携帯用のため、中性子線量率計のように寸法の大きい中性子減速体で包囲する構成では実用性に欠けることになる。しかし、個人被曝線量計は人体の胸部に固定するため、人体そのものが中性子減速体の役目を果たす作用がある。即ち、高速中性子が人体内で散乱(減速)し、その散乱成分が入射(一般にこの中性子をアルベド中性子と呼んでいる)するようになる。この条件下でボロンの粒径やプロトンラジエータの厚さを調節することにより線量当量応答を持つ中性子個人被曝線量計が実現できる。

【0018】次に、熱中性子と高速中性子の少なくとも一方に対して感度を高める方法について述べる。従来技術、コンバータやプロトンラジエータで発生した荷電粒子は、半導体検出素子の電極や表面にある酸化膜によって阻止され、感度が低下する。従来技術2では、コンバータやプロトンラジエータを設けた面とは反対側に電極を集めて設けている。しかし、このタイプは製作が困難である。本発明では、荷電粒子の入射側の電極は空乏層の一部を覆うように形成させる。このようにすることにより、電極の面積を低減できるとともに、電極による荷電粒子の阻止を低減できる。この結果、半導体検出素子に入射する荷電粒子数が増え、検出感度を高めることができる。

【0019】最後に、中性子線量率計について述べる。この構成は、前述したように、中性子検出器自体が実効線量当量応答D(E)を満足するのであれば、ファントムを人体を模擬するように構成すればよい。また逆に、中性子検出器自体が実効線量当量応答を満足することができなければ、全体的な感度は低下するかもしれないが、

ファントムをそれを補正するように構成し、全体として実効線量当量応答 $S(E)$ を満足させればよい。

【0020】前者の立場に立てば、上述した中性子個人被曝線量計を人体を模擬するファントムに設置すれば、実効線量当量応答 $S(E)$ を満足する被曝線量率計を提供できる。このようなファントムとして、一定の大きさを有する水或いはアクリル等がある。また、本発明の実施の形態では、更に中性子減速体や熱中性子吸収体でファントムの代替を実現する。例えば、半導体検出素子10を中性子減速体や熱中性子吸収体で包囲する。中性子減速体の厚さを増すことによって熱中性子の感度を下げ、高速中性子の感度を高める割合を調節できる。また、熱中性子吸収体の厚さや開口部の広さを調節する。開口部のある熱中性子吸収体は高速中性子を完全に透過し、熱中性子に対しては開口比で感度を調節できる。このようにすることによって、各エネルギーに対する感度を調節し、人体を模擬するファントムを提供できる。

【0021】後者の立場に立てば、中性子検出器として、シリコン以外の半導体検出素子から成る検出器を用いても良い。

【0022】以下、本発明の実施例について説明する。図1は、本発明の半導体式中性子個人被曝線量計の一実施例を示す。半導体検出素子1と前値増幅器、ディスクリミネーター、逆バイアス印加回路などの放射線計測回路（ハイブリッド回路）33、演算表示部34及び電源35を携帯用ケース32に収納する。この携帯線量計をクリップ36で人体の胸部に固定する。図3に人体31に半導体式中性子個人被曝線量計32を固定した状態を示す。

【0023】図4は半導体検出素子の構造と中性子個人被曝線量計の計測回路ブロック線図を示す。半導体検出素子1の構造をn型シリコンを用いる例で説明する。n型シリコンの表面1にp型の不純物（ボロン）を拡散しp-n接合（P層）8を形成する。この接合8の表面はシリコンの酸化皮膜（ $SiO_2$ ）9で絶縁保護する。点状\*



この $\alpha$ 線は1.47MeV エネルギーをもち、検出素子1の空乏層7内で電子e、正孔h対の電荷を生成し、これが検出器電流を変化させる。他の一つは、高速中性子がプロトンラジエータ6と相互作用（散乱）を起こし、反跳陽子（プロトン）を発生しこれが空乏層7内で電子e、正孔h対の電荷を生成し、これが検出器電流を変化させる。他の一つは、高速中性子がプロトンラジエータ6と相互作用（散乱）を起こし、反跳陽子（プロトン）を発生しこれが空乏層7内で電子e、正孔h対の電荷を※

$$N(1) = \phi \cdot n \cdot \sigma \cdot l$$

但し、 $\phi$ ：中性子の入射数（ $n/\text{cm}^2 \cdot \text{S}$ ）

$n$ ：コンバータの原子密度（ $1/\text{cm}^3$ ）

$\sigma$ ：核反応断面積（barn）

$l$ ：コンバータの厚さ（cm）

\*の信号取り出しの接合電極10を設け、接合面の反対側からはオームコンタクトで接地電極11を引出す。この両電極部10、11に逆バイアス12を印加すると、接合8の下に空乏層7が広がる。半導体検出素子1の表面には酸化皮膜9をはさんで粒状（粉末状）ボロン5が密着して焼成され、その隙間と外表面がプロトンラジエータ6（水素化合物）で埋められている。水素化合物としては例えばパラフィン、エポキシ、ポリエチレン等を用いる。図示はしていないが、検出素子全体はキャンに封入され、P層8とN層のリード電極はキャン外部に引き出される構造となっている。P層8の電極10は、 $\alpha$ 線やプロトンの減衰を防止するために、点状にしている。 $\alpha$ 線等の入射窓となる酸化皮膜9は100Å程度の厚さに容易に形成できるようになる。この入射窓に上述のコンバータやプロトンラジエータの層を設けることによって、電極10や酸化皮膜9による荷電粒子の減衰を抑えることができる。また、キャンの外部あるいはキャン内部には必要に応じて中性子減速材（図示せず）を用いる場合もある。このような本線量計の外部から入射する熱中性子(Nth)は熱中性子コンバータ5と核反応を起こし、 $\alpha$ 線を生成する。高速中性子(Nf)はプロトンラジエータとの散乱作用で反跳陽子（プロトン）を生成する。これらの $\alpha$ 線と陽子線は検出素子1内の空乏層7で電荷を生成する。熱中性子(Nth)と高速中性子(Nf)の入射に基づいて生成する電荷は交流結合コンデンサー13を介して、前置増幅器14、線形増幅器15で増幅する。増幅した信号はディスクリミネータ16で波高弁別し、計数回路17でパルス計測する。計数回路17で計数した計数値に基づき、演算表示部18で被曝量の演算と表示を行う。

【0024】本実施例における中性子検出の原理は、次の二つの相互作用に分けられる。一つは低エネルギーの熱中性子がボロン5で（数3）で示す核反応を起こし、 $\alpha$ 線を発生することによる。

【0025】

…（数3）

※生成することによる。本実施例はこの二つの相互作用の発生確率と発生する荷電粒子（ $\alpha$ 線、プロトン）の電荷収集効率を向上させることによって検出感度向上及び広いエネルギー範囲での検出を可能とするもので、その動作を以下に詳述する。

【0026】コンバータとしてのボロン5の核反応数 $N(1)$ は次式で表せる。

【0027】

…（数4）

である。この式から明らかなように、核反応数 $N(1)$ はコンバータの厚さ $l$ に依存し、その数値例が図5に示されている。一方、このコンバータから発生した $\alpha$ 線のボロンおよびシリコン中の飛程は $\sim 7 \mu\text{m}$ であり、ボロン

コンバータの厚さを7 $\mu\text{m}$ 以上にしたシリコン中を7 $\mu\text{m}$ 以上通過するような構成にすると、発生した $\alpha$ 線が減少し、検出器の感度向上には寄与しないことになる。即ち、 $\alpha$ 線の寄与はコンバータの厚さ7 $\mu\text{m}$ 以上で飽和することになる。

$$\sigma_p = (E_n) \\ = 4.83 / \sqrt{E_n} - 0.578 \text{ (barn)}$$

【0030】即ち、中性子の入射エネルギー $E_n$ の $-1/2$ 乗に比例して発生確率 $\sigma_p$ が変化するが、この発生確率はプロトンの散乱角度には依存しない。一方発生するプロトンが持つエネルギーは散乱角度に依存するので、単色の中性子から発生するプロトンのエネルギー分布は、エネルギー0 eVから中性子の入射エネルギー $E_n$ に至るまでの連続分布となる。このプロトンの飛程は10 MeVで1mm程度となるが、低エネルギーのプロトンはボロンの中を通過すると急速に減衰する。図4の実施例は以上の諸点を考慮して考案されたもので、加工の容易な粒状ボロン（平均粒径10 $\mu\text{m}$ ）5の層厚1cは、その中を通過する $\alpha$ 線の飛程を超えない範囲でなるべく厚く焼成して大きな核反応数 $N(1)$ が得られるように、ボロン100%の層厚7 $\mu\text{m}$ の厚さに相当する30 $\mu\text{m}$ （空孔率75%）とした。粒状ボロン5の隙間はプロトンラジエータ6で埋め、さらに、その外側を厚さ（1p=）2mmのプロトンラジエータ6でコーティングする。この構造によって、プロトンラジエータ6から発生するプロトンの低エネルギー成分の多くがボロン中を通過せず、従って減衰せずに検出素子1内に入り込むことが可能となる。また、粒状のボロン5から発生する $\alpha$ 線は、1.47 MeVのエネルギーを持っており、原子番号の小さい水素化合物で構成されたプロトンラジエータを数 $\mu\text{m}$ 通過しても殆ど遮蔽されることはない。さらに半導体検出素子1の側では、荷電粒子に対して不感な酸化皮膜9及びP層8は、 $\alpha$ 線等に減衰を与えるだけなので、これらは0.3 $\mu\text{m}$ 以下の厚さとして感度の低下を防ぐ。

【0031】以上説明したように、本実施例は単なる中性子個人被曝線量計としても、次のような効果をもつ。ボロンを粒状とすることにより、ボロンの実効厚を厚くとれるので、熱中性子検出感度を従来比で10倍程度向上させることができる。また、高速中性子、特に低エネルギー側の高速中性子に対するボロンの遮蔽効果を低減できるので、高速中性子の検出感度も全体的に向上させることができる。また、製作技術的にも粒状ボロンを焼成（蒸発乾固）する方法には困難はなく、さらに浸透性の水素化合物で浸透・コーティングすることによって、ボロン層の温度変化によるはく離減少を防止することができる。尚焼成以外の形成方法もありうる。例えば、ボロンとプロトンラジエータの混合層をプラスチック製の薄い固定膜で半導体検出素子に固定してもよい。最後

\*【0028】一方、高速中性子がプロトンラジエータ6で散乱して発生するプロトンの発生確率 $\sigma_p$ は、中性子の入射エネルギーを $E_n(\text{MeV})$ としたとき次式で与えられる。

$$\sigma_p = (E_n)$$

…(数5)

に、ボロン等の荷電粒子への変換素子側の電極をポイント状にすることにより、変換された荷電粒子の半導体検出素子側への通過部分の電極をなくすることができ、更に酸化皮膜9を薄くできるので、荷電粒子の半導体検出素子側への透過率を向上し、中性子エネルギーの広範囲にわたって、検出感度を高めることができる。

【0032】次に、ICRP勧告に沿った実効線量当量評価ができる中性子個人被曝線量計について述べる。今日の放射線障害防止法令によれば、ICRP勧告に沿った実効線量当量評価が可能なエネルギー応答特性を持つ中性子検出器が必要であり、前述の実施例の検出器はこのような目的にも合致するものである。即ち、図4のプロトンラジエータ6のコーティング層の厚さ1p、粒状ボロン5の粒径あるいはプロトンラジエータと粒状ボロンの量の比を変化させると高速中性子に対する検出感度を調節できる。なお図6の実線のカーブはICRP勧告による中性子エネルギーと実効線量当量（人体への影響度を示す）の関係をしており、図中○印は、本実施例の特性を、×印は従来の検出器の特性を示す。なお、図6はデータは熱中性子と数100 KeVから15 MeVの範囲に限定しているが、数100 KeVから熱中性子迄の間はモンテカルロ計算で補間した。これは現状技術では、この中間領域のデータを実験的に収集できないからである。

【0033】中性子個人被曝線量計は、図3に示すように人体の胸部に装着されて使用される。従って、中性子個人被曝線量計の校正試験は、人体から散乱されてくる中性子を考慮して行う必要がある。図6は、人体の胸部に線量計を固定する代わりにファントム（アクリルあるいは水で、寸法40×40×15 cm）の中央に線量計を固定して行ったものである。図7に人体を模擬したファントム内での中性子の振舞を示す。高速中性子の一部は線量計内のプロトンラジエータと相互作用を起すが、多くはファントム30に到達し、散乱を起す。その散乱線の一部が中性子検出素子1に入射する。当然、線量計に入射する中性子のエネルギーは入射中性子のエネルギーを最大として熱中性子まで存在することになる。線量計内のコンバータの種類、粒径、層厚、及びプロトンラジエータの種類、層厚を調節することにより実効線量当量の応答を容易に得ることができる。

【0034】以上説明した本実施例の中性子個人被曝線量計のエネルギー応答特性は、従来例と比べて、高エネ

ルギー領域でもよく一致している。実効線量当量の応答と良く一致しており、実用的な中性子個人被曝線量計を提供できることが分かる。

【0035】なお、図4の実施例では、粒状ボロンを焼成し、その間隙及び上記をプロトンラジエータで埋める構造により荷電粒子を発生させるようにしたが、これをボロンと水素化合物との化合物、混合物等で置きかえてもよい。

【0036】図8に本発明の中性子検出器の第2の実施例を示す。本実施例では、開口部のあるボロン板50を半導体検出素子1に設け、その開口部にプロトンラジエータ51を埋め込む構造とする。本実施例では、ボロン板の開口部の面積（開口部が円の場合はその直径）を調節することによって検出器の応答を調整できる。この開口部のあるボロン板の製作方法は、金属マスク前面にスパッタリング等でボロン層を作り、その後、金属マスクを取りはずすことによって任意の形状のボロンを形成できる。このように形成したボロン板を半導体検出素子1の表面に密着して取り付ける。取付方法は接着剤あるいは端部を機械的に固定する単純な手段で機能を果たすことができる。

【0037】本実施例においても、第1の実施例と同様な効果を果たすことができる。

【0038】図9に本発明の第3の実施例を示す。本実施例は、半導体検出素子1の上にプロトンラジエータ53だけを設け、高速中性子に対してのみ有感を検出器としたものである。プロトンラジエータ53は、図4の場合と同様、パラフィン等を塗布することにより容易に作製できる。本実施例においては高速中性子に対して検出感度の高い中性子個人被曝線量計を提供できる。

【0039】図10に本発明の第4の実施例を示す。本実施例は、半導体検出素子1の面上に粒状ボロン層55を形成し、その上面を水素を含まない物質、例えばアルミ蒸着膜56で保護する。この検出器は熱中性子だけを検出するもので、粒状ボロンを用いることで温度変化によるはく離の心配なくその層の厚さを十分にとり、熱中性子の検出感度を向上させたものである。本実施例においては熱中性子に対して検出感度の高い中性子個人被曝線量計を提供できる。

【0040】以上の各実施例においては、熱中性子との核反応材料としてボロンを用いるものとしたが、これをリチウムの核反応 ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ を利用してもよいし、ウランを用いてもよい。この場合、生成される $\alpha$ 線のエネルギーがボロンとは異なるので、その飛程に従ってコンバータ厚を設定する必要がある。また、高速中性子の増感作用物質として水素化合物等のプロトンラジエータを例として説明しているが、高速中性子と相互作用を起して重荷電粒子を発生させる材料であれば他の物質でもよい。さらにシリコン半導体を用いた半導体検出素子の例を述べているが、テルル化カドミウムやヨウ化

水銀等の化合物半導体を用いた検出素子を用いることもできる。

【0041】次に、中性子線量率計について述べる。

【0042】図11は、半導体中性子線量率計の一実施例を示す。本実施例は球形の中性子減速体2とその外殻を開口部のある熱中性子吸収体3で人体を模擬するファントムを構成し、その中に上述した半導体中性子検出器40を設けたものである。中性子の検出信号は信号ケーブルを介して外部の放射線計測回路60に送る。この球形の中性子減速体2を用いる体系が、最も無指向性を維持する線量率計を実現できる。図12は、本発明の中性子検出部の模式図を示す。図4で示した半導体検出器をパラフィンやポリエチレンなどの中性子減速体2と開口部のあるカドミウム板などの熱中性子吸収体3の中央に設ける。図12では、半導体検出素子1を封入する金属ケース（キャン）及び信号取り出しの信号ケーブルは図示省略している。本線量率計の外部から入射する熱中性子(Nth)は、熱中性子吸収体3と中性子減速体2に一部吸収され、一部が検出素子1に到達する。ここで熱中性子コンバータ5と核反応を起し、 $\alpha$ 線を生成する。高速中性子(Nf)は熱中性子吸収体3に吸収されることなく中性子減速体2に到達し、ここで一部熱中性子に減速されるが他の一部はプロトンラジエータ6に到達する。プロトンラジエータでは高速中性子との散乱作用で反跳陽子（プロトン）を生成する。これらの生成 $\alpha$ 線と陽子線の電荷は半導体検出素子1内の空乏層7で収集される。

【0043】図13は中性子検出器の構造と放射線計測回路60のブロック線図を示す。中性子検出器の構造は図4に示すものと同様であるので説明は省略する。放射線計測回路60は、基本的には図4と同じであるが、ディスクリミネータ16、計数回路17を2種類設け、添字a系統はエネルギー依存性の全体の計数を示し、添字b系統は後述するある一定以上のエネルギーをもつ高速中性子弁別用の回路である。

【0044】図14に、本発明の中性子線量率計のエネルギー応答を調べた結果の一例を示す。この図は中性子減速体厚をパラメータにして調べた結果である。このときの中性子線量率計の主な構造仕様は以下のとおりである。

【0045】  
ボロンの粒径 : 20  $\mu\text{m}$   
プロトンラジエータ厚 : 2mm  
熱中性子吸収体開口比 : 70%（開口率）（厚さ0.5mmのカドミウム）

このように、中性子減速体厚を変化することによって、線量当量の応答を変化させることができる。

【0046】図15は本発明の中性子線量率計の応答と線量当量の応答と比較した結果を示す。中性子減速体厚は80mmのものである（図14の減速体厚80mmのデー



タ)。この場合も、図5と同様に補完している。この結果からも明らかなように、本発明の中性子線量率計の応答は熱中性子から15 MeVのエネルギー領域にわたって線量当量応答と±30%の高精度で一致する。同時に従来の線量率計の応答例を示している。従来の線量率計は数MeV以上で感度が低下する。

【0047】以上説明したように、中性子減速体厚を調節することによって実効線量当量応答が実現できる。また、以上の説明では、中性子減速体厚を調節したが、熱中性子吸収体厚やその開口比を調節してもよい。本発明の中性子線量率計は原子力発電所等の放射線取扱い施設のエリアモニタ、周辺環境モニタ、サーベイメータ等に採用することが可能であり、実用的な新しい測定器を提供できる。

【0048】図16に本発明の第2の中性子線量率計の実施例を示す。これは、無指向性を維持するため球に近い中性子減速体として、直径と高さが同一の直円体にしたものである。半導体中性子検出器40を中央に設け、中性子減速体2の外形に沿って開口部のある熱中性子吸収体3を設ける。中性子検出信号は信号ケーブルを介して、計測回路60とデータ処理部を含む指示計器20に送る。中性子減速体2の外形が球のものは製造コストが高くなる。中性子減速体2の形状が球に近い直円体にすることによって大幅なコスト低減が図れる。中性子減速体2の形状が球形以外になることによって、指向性が生じる可能性がある。図17に本実施例の垂直方向の指向性を調べた結果を示す。この結果からも明らかなように±10%以内で指向性は無視できる。これは中性子が減速体内で何回も散乱されるので、指向性が緩和されることによる。

【0049】この検証結果に基づき、以下の変形例が考えられる。図18は正方体の中性子減速体2のコーナを全てカットした形状を示す。図19はその正面図を示す。中性子検出器40はいずれも中央に設ける。図20は直円体の中性子減速体2のコーナをカットする変形例を示す。これらの変形例はいずれも本発明の性能を十分維持できるものである。図18、図19、図20で熱中性子吸収体3の図示は省略している。

【0050】図21は熱中性子吸収体3の設置に関する変形例を示す。図21では中性子減速体2の内部に開口部のある熱中性子吸収体3を設けている。図22は中性子減速体2と中性子検出器40の間に、開口部のある熱中性子吸収体3を設けた変形例を示す。熱中性子吸収体3は中性子減速体2の内部に設ける方が熱中性子吸収体3の設置量が少なくてすむ効果がある。

【0051】図23に本発明で計測される信号の波高分布(スペクトル)の一例を示す。波高値AとBで示した丸印αの領域が熱中性子との核反応で生成するα線の波高領域である。波高値B以上が数MeVの高速中性子と相互作用を起して生成するプロトンの波高領域である。

波高値B以下はγ線の波高値である。ディスクリレベルをA、BあるいはB以上で多段に設けることによって、それぞれの出力信号から高速中性子のエネルギー成分を同時弁別することが容易に可能となる(図13の計測回路ブロック図参照)。当然、中性子のエネルギーと波高値の校正係数および各波高領域における中性子検出の感度係数はあらかじめ求めておき、絶対値への換算データ処理は必要となる。高エネルギー加速器を利用する施設では高速中性子の同時弁別計測のニーズが多く、本発明の適用範囲は極めて広い。

【0052】また、熱中性子吸収体においてもボロン、リチウムなどをカドミニウムの代用にできる。上述した実施例では熱中性子吸収体の開口比で熱中性子成分の検出感度を調節しているが、熱中性子吸収体の厚さを変えることによって感度調節は可能である。

【0053】更に個人被曝線量計と同様に、検出素子として半導体検出素子を用いたが、テルル比カドニウムやヨウ化水銀等の化合物半導体を用いてもよい。

【0054】人体の模擬するファントムとして、中性子減速体や熱中性子吸収体を用いた個人被曝線量計で説明したようにある一定の大きさをもつ水やアクリル等の上に実効線量当量を実現できる中性子検出器を搭載することで、実効線量当量の応答を実現する中性子線量率計を実現できる。

【0055】また、以上の説明においては、中性子検出器が実効線量当量の応答を実現する場合について述べた。しかし、中性子減速体や熱中性子吸収体の厚さ等を変えることによって線量当量の応答を変えることができる。そこで、中性子検出器自体は実効線量当量の応答を実現できなくても、それらを囲む中性子減速体や熱中性子吸収体の厚さ等を変えることによって、中性子線量率計全体で実効線量当量の応答を実現することも可能である。この場合、実効線量当量の応答を実現する中性子線量率計を提供する立場からすれば、中性子検出器はBF<sub>3</sub>計数管や<sup>3</sup>He計数管等でもよい。

【0056】最後に、以上の説明では、中性子減速体や熱中性子吸収体を囲むように設置したが、中性子線量率計を壁に沿って設置する場合には、中性子が入射してくる方向は限定されるから、その方向のみに中性子減速体や熱中性子吸収体を設けてもよい。

【0057】

【発明の効果】以上説明したように、本発明によれば、線量当量応答を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の中性子個人被曝線量計の第1の実施例を示す図である。

【図2】実効線量当量応答と中性子検出器の応答、ファントムの応答及び入射エネルギースペクトルとの関係を示したものである。

【図3】本発明の中性子個人被曝線量計の人体固定状態

を示す図である。

【図4】中性子個人被曝線量計の半導体中性子検出器の構造と計測回路ブロック線図を示す。

【図5】核反応数 $N(1)$ とコンバータの厚さの関係を示す図である。

【図6】本発明の中性子個人被曝線量計の応答と実効線量当量の応答と比較した結果を示す図である。

【図7】本発明の個人被曝線量計の校正時の状態を示す図である。

【図8】本発明の中性子個人被曝線量計の第2の実施例を示す図である。

【図9】本発明の中性子個人被曝線量計の第3の実施例を示す図である。

【図10】本発明の中性子個人被曝線量計の第4の実施例を示す図である。

【図11】本発明の中性子線量率計の第1の実施例を示す図である。

【図12】第1の実施例の中性子検出部の模式図を示す図である。

【図13】中性子検出器の構造と放射線計測回路60のブロック線図を示す図である。

【図14】本発明の中性子線量率計の中性子減速体厚を変えたときのエネルギー応答を示す図である。

【図15】本発明の中性子線量率計の応答と実効線量当\*

\*量の応答と比較した結果を示す図である。

【図16】本発明の中性子線量率計の第2の実施例を示す図である。

【図17】本発明の中性子線量率計の第2の実施例の垂直方向の指向性を示す図である。

【図18】本発明の中性子線量率計の他の実施例を示す図である。

【図19】図18に示す他の実施例の断面図である。

【図20】本発明の中性子線量率計の他の実施例を示す図である。

【図21】熱中性子吸収体を中性子減速体の内部に設けた中性子線量率計の実施例を示す図である。

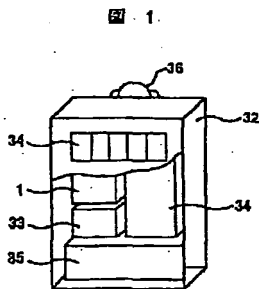
【図22】熱中性子吸収体を中性子減速体の内側に設けた中性子線量率計の実施例を示す図である。

【図23】本発明で計測される信号の波高分布例を示す図である。

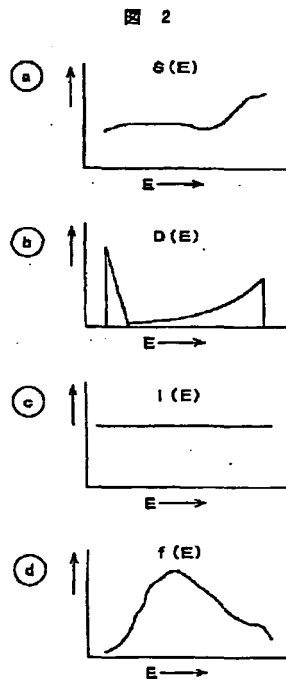
【符号の説明】

1…半導体検出素子、4、10…電極、5…ボロン、6…プロトンラジエータ、7…空乏層、8…P層、9…酸化皮膜、11…接地電極、12…逆バイアス、13…コンデンサー、14…前置増幅器、15…線形増幅器、16…ディスクリミネータ、17…計数回路、18…演算表示部。

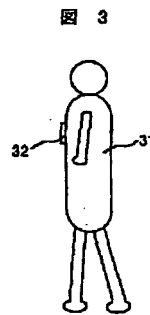
【図1】



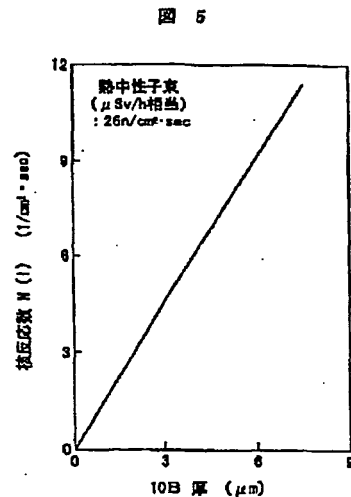
【図2】



【図3】

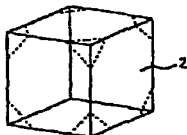


【図5】

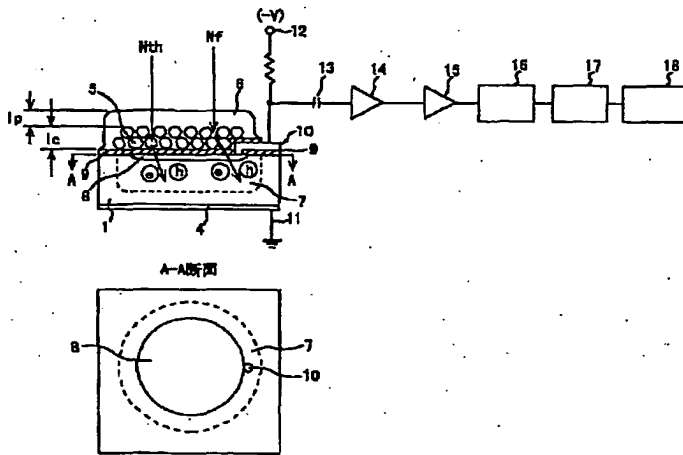


【図18】

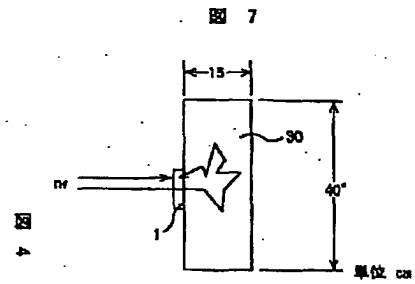
図 18



【図4】

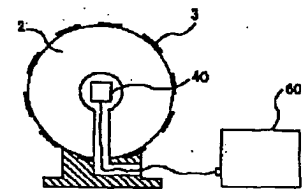


【図7】



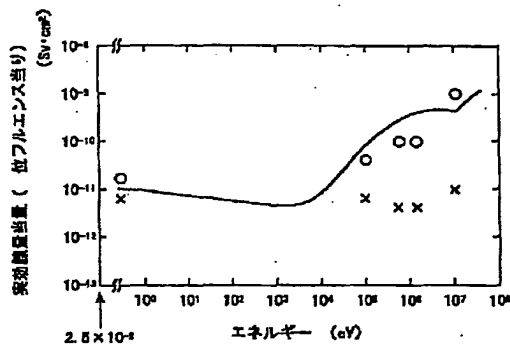
【図11】

図 11



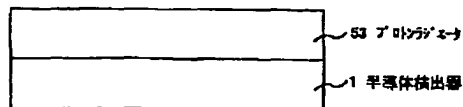
【図6】

図 6



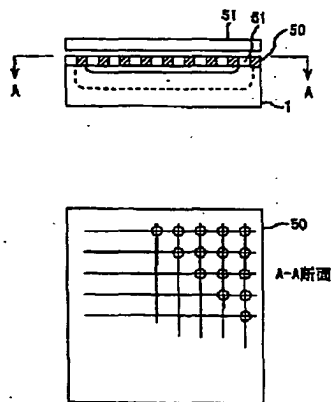
【図9】

図 9



【図8】

図 8



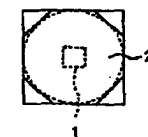
【図10】

図 10



【図19】

図 19



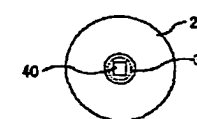
【図20】

図 20



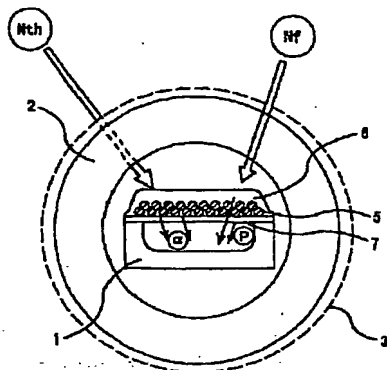
【図22】

図 22



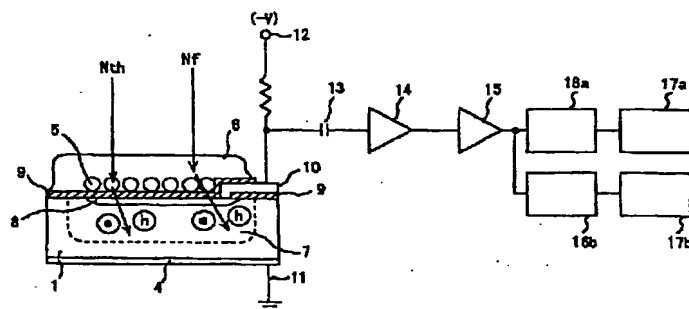
【図12】

図 12



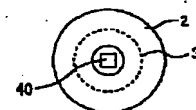
【図13】

図 13



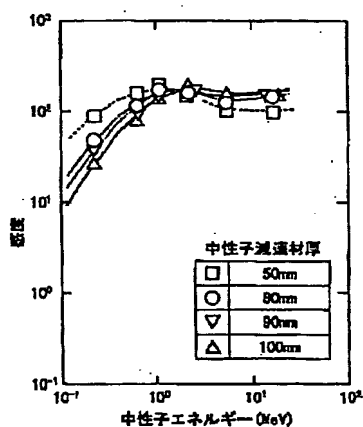
【図21】

図 21



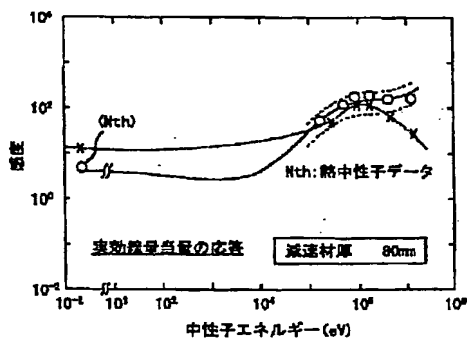
【図14】

図 14



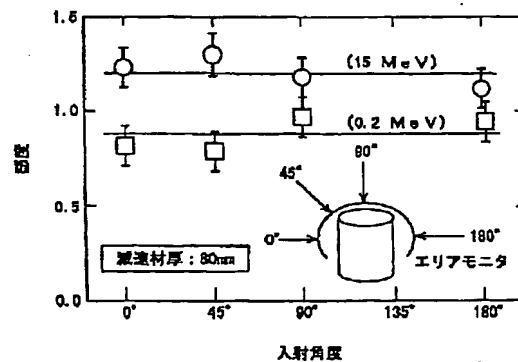
【図15】

図 15



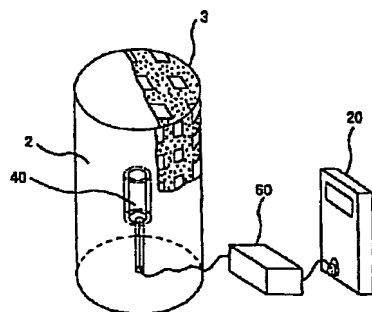
【図17】

図 17



【図16】

図 16



【図23】

図 23

